

预应力 CFRP 板平板锚具承载力评估理论与试验研究

储培宇¹, 钱登朝², 诸葛萍^{1*}, 杨科龙¹

(1.宁波大学 土木与环境工程学院, 浙江 宁波 315211; 2.温州市公路与运输管理中心, 浙江 温州 325000)

摘要: 为揭示 CFRP 板平板锚具的锚固机理, 建立了该锚具的承载力理论模型, 并利用该模型预测 CFRP 板平板锚具的临界锚固长度. 通过试验获得了模型所需的锚固界面剪应力与压应力的关系式. 该模型研究了锚固区界面剪应力的纵向折减及横向压应力分布的不均匀性, 并通过试验测得了界面剪应力的纵向折减系数. 利用上述模型就平板锚具设计参数对锚固性能的影响进行了分析. 结果表明, 界面剪应力折减率随着锚固长度的增大而增大, 横向压应力分布的不均匀性随着锚固宽度的增大而增大, 增大界面压应力和夹板厚度能有效提高横向压应力分布的均匀度; 临界锚固长度随夹板厚度的增大而减小, 且当夹板达到合适厚度后继续增大, 对临界锚固长度的影响逐渐变小; 随着界面压应力的增大, 界面剪应力增大, 临界锚固长度减小; 对于工程常用 CFRP 板尺寸 100 mm×2.0 mm, 当界面压应力取 100 MPa, 平板锚具夹板厚度取 32 mm 时, 所需的临界锚固长度为 296 mm, 对应的锚具设计承载力为 480 kN, 理论上能使 CFRP 板抗拉强度获充分发挥.

关键词: 桥梁工程; CFRP 板; 平板锚具; 界面剪应力; 承载力

中图分类号: U444

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2020) 04-0041-08

碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)具有轻质、高强、耐腐蚀、耐疲劳等优点^[1], 在工程结构加固领域应用前景良好. 加固用 CFRP 通常有筋材和片材两种形式, CFRP 筋材可作为斜拉索应用于斜拉桥, 作为主缆和吊索应用于大跨悬索桥和拱桥, 以及作为预应力束应用于混凝土主梁^[2]; CFRP 片材可用于桥梁、房屋的加固, 提高结构的承载力^[3]. 采用预应力 CFRP 板加固桥梁, 可较好地发挥 CFRP 板的抗拉作用, CFRP 板锚具是其中最为关键的装置. CFRP 板锚具按构造形式可分为平板锚具、波形齿锚具和夹片式锚具等. 其中, 平板锚具具有操作简易、经济性好、施工方便等优点. 平板锚具通过多排高强螺栓对锚固区域的 CFRP 板施加预紧力, 通过界面剪应力平衡 CFRP 板的拉力达到锚固效果.

在 CFRP 板锚固技术研究方面, 最具代表性的

有瑞士 Sika 工程公司研发的“应力头”加固技术^[4], ElHacha 等^[5]研发的预应力张拉锚固体系. Ali 等^[6]对钢筋混凝土梁进行加固, 发现直接用 CFRP 板加固试验梁时其延性最大, 而用锚具锚固 CFRP 板加固试验梁时其延性最小. Garden 等^[7]研究表明, 为保证 CFRP 板充分发挥强度, 需要合适的锚固体系, 梁的预应力度决定预应力 CFRP 板加固梁极限承载力的提高幅度. Andra 等^[8]研发了一种 CFRP 板锚固装置, 使用该装置能将 CFRP 板张拉到 1 000 MPa. Burtscher^[9]研发了一种 CFRP 板楔形锚具, 由钢板和环氧树脂层构成, 用该锚具锚固 1.2 mm×50 mm 的 CFRP 板能充分发挥其抗拉强度, 锚固效率达到 110%. Kim 等^[10]研发了一种非金属预应力锚固体系并运用于钢筋混凝土梁的加固. 国内在 CFRP 板加固领域起步较晚, 薛伟辰等^[11]提出了 CFRP 板预应力损失和预应力 CFRP 板加固混凝土

收稿日期: 2019-10-14.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal1g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省公路与运输管理中心科技计划(2019H18); 国家山区公路工程技术研究中心开放基金(GSGZJ-2019-04).

第一作者: 储培宇(1994-), 男, 浙江宁海人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 桥梁工程. E-mail: 501454974@qq.com

*通信作者: 诸葛萍(1982-), 男, 浙江瑞安人, 副教授, 主要研究方向: 桥梁工程. E-mail: zhugeping@nbu.edu.cn

梁抗裂度的计算方法. 尚守平等^[12]设计了一种平板锚具, 对上下夹板的内表面锚固区域开槽增大锚固界面的摩擦系数, 提高锚具的锚固承载力. 邓朗妮等^[13]研发设计了一种夹片式锚具, 通过3种不同破坏模式分别计算加固板的极限承载力, 提出弯冲破坏模式计算极限承载力与试验结果最接近. 卓静等^[14]研发了一种波形齿夹具锚, 采用两端先固定, 再中间紧固的预应力工艺对 CFRP 材料进行预张拉, 能够大幅提高材料的强度利用率. 吴志平等^[15]对 21 幅平板锚具进行张拉试验, 得出 CFRP 板平均应变损失率为 6.3% 左右的结论.

目前, CFRP 板锚具在设计、理论计算及试验研究方面还存在如下问题: (1) 在 CFRP 板锚具设计参数对锚固性能的影响机理和锚固区力学性能的影响规律, 以及锚具承载力理论评估研究方面还比较缺乏; (2) 锚具金属组件-CFRP 板界面纵横向剪应力分布情况及如何确定合理的剪应力分布形式还有待进一步开展理论和试验研究; (3) 锚固系统的优化设计方法还有待建立; (4) 适用于不同规格 CFRP 板的合理锚具设计参数也有待确定.

本文对 CFRP 板平板锚具锚固承载力和临界锚固长度计算模型、锚具的优化设计方法进行了研究, 揭示了该型锚具的锚固机理, 并对模型计算所需的锚固折减系数和锚固区 CFRP 板界面压应力、剪应力的关系进行了理论计算和试验实测. 通过优化设计获得了不同规格 CFRP 板平板锚具的夹板尺寸和界面压应力设计参数, 可为平板锚具的工程应用提供参考.

1 锚具承载力模型

CFRP 板平板锚具构造如图 1 所示.

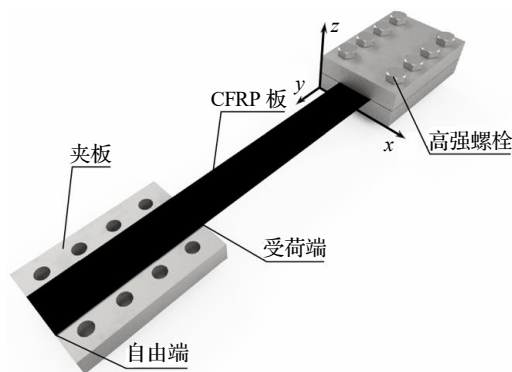


图 1 平板锚具构造

锚具承载力的影响因素有 CFRP 板尺寸、锚固长度、界面压应力和夹板厚度等. 在不考虑锚具锚固区纵横向锚固性能折减的理想状态下, 平板锚具的承载力公式可表示为:

$$F_u = 2\tau lb, \quad (1)$$

式中: F_u 为锚具承载力; l 为 CFRP 板锚固长度; b 为 CFRP 板宽度; τ 为界面剪应力.

假设 CFRP 板张拉过程中所有构件均处于线弹性状态, 在张拉到极限承载力的过程中, 锚固区 CFRP 板从自由端到受荷端(图 1)发生弹性拉伸变形, 其中受荷端的弹性拉伸量最大, 锚固区夹板-CFRP 板界面因板材弹性拉伸变形受反复摩擦作用, 界面摩擦系数逐渐变小, 界面剪应力也随之减小, 极限状态下, 受荷端界面剪应力最小. 因此, 在计算锚具承载力时需考虑纵向折减, 引入纵向折减系数 η_1 . 由于拧紧螺栓后, 两块夹板会发生垂直于板件横向的变形, 导致 CFRP 板横向压应力分布两端大中间小, 如图 2 所示. 引入有效宽度 b_e , CFRP 板横向两端 b_e 宽度范围内为高应力区域, 该区域 CFRP 板能发挥极限抗拉强度; CFRP 板中部低应力区域只能提供较低的单位面积承载力. 因此, 在计算锚具承载力时, 可将 CFRP 板横向分为两端有效宽度区域和中部低应力区域分别计算. 结合公式(1), 可得改进后的锚具承载力公式:

$$F_u = 2f_{au}b_e t_c + 2\eta_1 \tau l b = 2f_{au}b_e t_c + 2\eta_1 l \int_{b_e}^{b-b_e} \tau(x) dx, \quad (2)$$

式中: $\tau(x)$ 为 CFRP 板横向界面剪应力分布; f_{au} 为 CFRP 板极限抗拉强度, 取碳纤维原丝极限抗拉强度的 70%; t_c 为 CFRP 板厚度; η_1 为纵向折减系数.

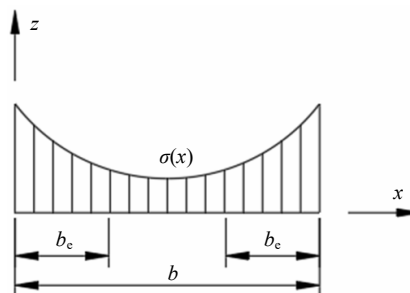


图 2 CFRP 横向压应力分布图

图 3 为锚固区域 CFRP 板受力示意, 为得到有效宽度和锚固长度的关系, 在有效宽度 b_e 处取微

段 dx , 因微段 dx 足够小, 此时应选用碳纤维原丝的极限抗拉强度进行计算, 并且 CFRP 板中碳纤维原丝的质量分数为 70% 左右, 则可得如下关系式:

$$f_{au} t_c dx = 2\tau(b_e) dx, \quad (3)$$

式中, $\tau(b_e)$ 为有效宽度 b_e 处的界面剪应力。

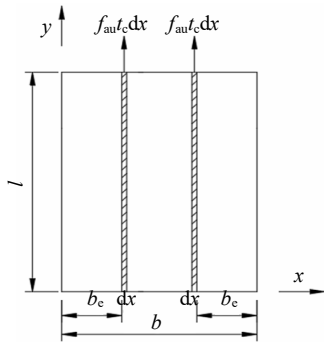


图3 CFRP 板受力示意

为充分发挥 CFRP 板的抗拉强度, 锚具承载力需大于等于 CFRP 板的设计承载力, 即:

$$F_u = 2f_{au} b_e t_c + 2\eta_l l_{cr} \int_{b_e}^{b-b_e} \tau(x) dx \geq f_{cu} b t_c, \quad (4)$$

式中: l_{cr} 为临界锚固长度; f_{cu} 为 CFRP 板抗拉强度设计值。

1.1 CFRP 板纵向折减系数 η_l

为获得锚固区 CFRP 板界面的残余剪应力, 对较小锚固长度的小试件进行剪应力试验实测, 由于试件对应接触界面面积很小, 可认为在 CFRP 板锚固区域内的界面剪应力是均匀分布的, 则 CFRP 板界面剪应力与拉力之间的关系如下:

$$\tau = \frac{F}{2bl}. \quad (5)$$

工程中, 锚具受张拉荷载作用时, CFRP 板弹性变形并不是同时进行的, 可以把 CFRP 板看作 n 小段, 从受荷端最先开始发生弹性变形, 各小段通过变形将力从受荷端向自由端传递, 越靠近自由端, 需要平衡的界面剪应力越大. 当张拉到最大拉力 F_t 时, 受荷端轴力达到最大, 而自由端刚刚开始滑动, 拉力与界面剪应力平衡, 拉力为 0, 此时 CFRP 板纵向轴力和界面剪应力分布情况分别如图 4(a) 和 4(b) 所示. 故 CFRP 板锚固长度范围内平均轴力大小为 $0.5F_t$, 计算可得界面剪应力 τ 和 CFRP 板锚固区域弹性变形量 Δl :

$$\tau = \frac{F_t}{4bl}, \quad \Delta l = \frac{F_t l}{2E_c b t_c}, \quad (6)$$

式中: E_c 为 CFRP 板抗拉弹性模量; F_t 为 CFRP 板最大拉力。

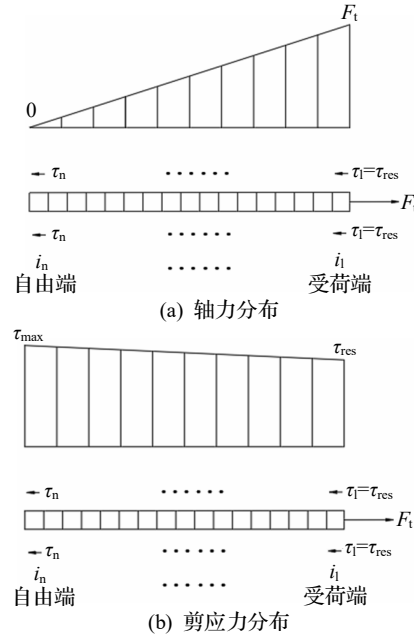


图4 锚固区 CFRP 板力的分布

通过对较小锚固长度的夹板-CFRP 板试件进行张拉试验可获得试件的界面剪应力—锚固区滑移关系曲线, 如图 5 所示. 图中最大剪应力与残余剪应力之间的下降段对应的滑移量与实际工程锚具受荷端 CFRP 滑移量(由公式 6 获得)相等时, 即可获得界面残余剪应力 τ_{res} , 并由此可得出锚固纵向折减系数:

$$\eta_l = \frac{\tau_{res}}{\tau_{max}}. \quad (7)$$

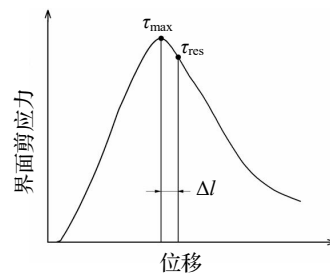


图5 界面剪应力—位移曲线

结合式(6)和图 5 可得, 纵向折减系数与临界锚固长度和 CFRP 板宽厚有关, 临界锚固长度越大, 纵向折减系数越小, 实际界面剪应力越小, 锚具承载力越小。

1.2 CFRP 板横向压应力分布 $\sigma(x)$

当锚具组装完成后, 锚固区受较大螺栓预紧

力作用, CFRP 板受到夹板对它的均布荷载 q 的作用, 同时夹板受到 CFRP 板的反作用力而发生变形, 且变形量中部大、两端小, 导致 CFRP 横向压缩量中部小、两端大, 压应力分布不均匀, 如图 6 所示. 因钢材的弹性模量远大于 CFRP 板厚度方向的压缩模量, 故任意锚具横截面处 CFRP 板宽度方向各点和两端压缩量的差值即为夹板对应位置的变形量. 由于螺栓预紧后螺母和螺头紧贴夹板, 约束夹板发生转动, 因此可将夹板看作两端固定受均布荷载的作用, 取单位张拉方向宽度 a , 通过计算可推导出 CFRP 板横向压应力分布的表达式.

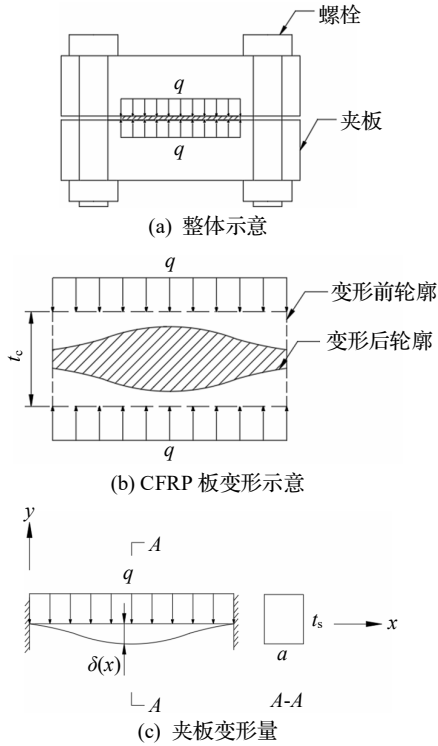


图 6 受力示意

由图 6(c)计算模型可得夹板变形量:

$$\delta(x) = \frac{qb^2x^2}{24E_sI_s} \left(1 - \frac{x}{b}\right)^2, \quad (8)$$

式中: $\delta(x)$ 为夹板变形量(即 CFRP 板宽度方向上各点相对于端部少压缩的量); $q = \sigma_c a$ 为均布荷载, 其中 σ_c 为锚固区域界面压应力; E_s 为夹板弹性模量; $I_s = at_s^3/12$ 为夹板惯性矩, 其中 t_s 为夹板厚度.

由式(8)可得单位张拉方向宽度 a 范围内 CFRP 板横向宽度方向上各点相对于两端的应力差值:

$$\Delta\sigma(x) = \frac{E_{ct} \cdot \delta(x)}{0.5t_c} = \frac{E_{ct}\sigma_c b^2}{E_s t_c t_s^3} x^2 \left(1 - \frac{x}{b}\right)^2, \quad (9)$$

式中, E_{ct} 为碳板厚度方向的弹性模量.

假设 CFRP 板横向端部应力为 σ_0 , 可得横向各点的压应力 $\sigma(x)$:

$$\sigma(x) = \sigma_0 - \Delta\sigma(x) = \sigma_0 - \frac{E_{ct}\sigma_c b^2}{E_s t_c t_s^3} x^2 \left(1 - \frac{x}{b}\right)^2. \quad (10)$$

根据横向不均匀压应力之和等于螺栓作用于界面的平均压应力之和可得:

$$\int_0^b \sigma(x) dx = \sigma_c b. \quad (11)$$

结合公式(10)和(11)可得:

$$\sigma(x) = \sigma_c \left[1 + \frac{E_{ct} b^4}{30 E_s t_c t_s^3} - \frac{E_{ct} b^2}{E_s t_c t_s^3} x^2 \left(1 - \frac{x}{b}\right)^2 \right]. \quad (12)$$

由公式(12)可以看出, CFRP 板横向压应力分布与 CFRP 板宽厚、夹板厚度和界面压应力有关, 且锚固越宽的 CFRP 板, 其横向压应力分布越不均匀, 增大界面压应力或增大夹板厚度能改善横向压应力分布的不均匀度.

2 试验研究

根据 1.1 部分计算理论结合试验实测, 可获得锚固区界面剪应力与压应力的关系和锚固区界面剪应力纵向折减系数. 公式(6)所需锚固长度假设为 $l = 400$ mm, CFRP 板拉力取设计承载力 $F_{cu} = f_{cu} b t_c$, 其中 f_{cu} 为 CFRP 板的抗拉强度设计值, 假设为 2 400 MPa.

2.1 试验设计

试验小试件构造如图 7 所示. 试件一端作为张拉端, CFRP 板的锚固长度为 40 mm; 另一端作为固定端, 锚固长度为 80 mm. 试件中上下夹板采用 45 号钢, 厚度为 25 mm, 螺栓采用 12.9 级 $\Phi 14$ 高强螺栓, CFRP 板的尺寸为 50 mm $\times$ 1.4 mm, 其抗拉强度设计值为 2 400 MPa. 通过试验实测得 CFRP 板抗拉弹性模量为 170 GPa, 厚度方向压缩弹性模量为 4.3 GPa.

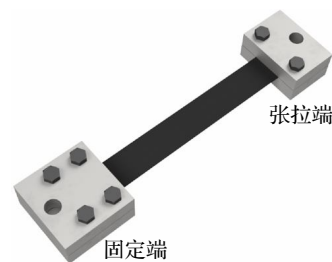


图 7 试件构造

CFRP 板界面压应力大小通过螺栓轴力大小进行控制, 螺栓轴力通过扭力扳手施加. 螺栓轴力与扭力扳手扭矩的关系可以通过伺服万能试验机、压力传感器和应变仪进行标定.

共进行了 4 种工况的试验, 每种工况设 4 个试件(编号为 S-i-1、S-i-2、S-i-3、S-i-4), 各工况试件的界面压应力不同, 见表 1.

表 1 试验工况表

试件编号	$b \times t_c / (\text{mm} \times \text{mm})$	σ_c / MPa	试件数量
S-1	50×1.4	25	4
S-2	50×1.4	50	4
S-3	50×1.4	75	4
S-4	50×1.4	100	4

2.2 张拉试验

利用万能伺服试验机对试件进行张拉, 并记录试验过程中各工况力与位移相关数据. 试件安装如图 8 所示. 根据 JSCE-E531-1995^[16]相关规定, 本次试验加载速度取 $300 \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$. 试验结果见表 2, 部分张拉曲线如图 9 所示.



图 8 试件张拉

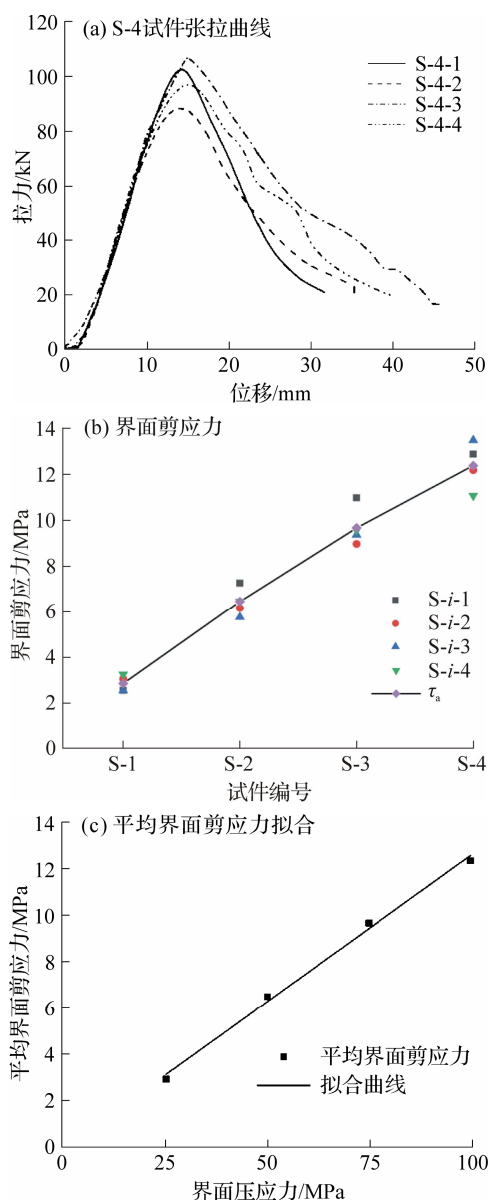


图 9 张拉试验结果

由图 9(a)可知, 拉力线性上升阶段, 锚固区域 CFRP 板存在弹性变形, 整体未发生滑移, 当拉力达到峰值后开始下降, 此时 CFRP 板开始滑移, CFRP 板滑移破坏形态如图 10 所示. 由图 9(b)、9(c)

表 2 试验结果

试件编号	σ_c / MPa	F_{ta} / kN	τ_a / MPa	τ_{resa} / MPa	破坏形态	纵向折减系数
S-1	25	23.3	2.9	2.6	锚固端 CFRP 板滑移	0.91
S-2	50	51.8	6.5	6.1	锚固端 CFRP 板滑移	0.94
S-3	75	77.9	9.7	8.9	锚固端 CFRP 板滑移	0.92
S-4	100	99.2	12.4	11.3	锚固端 CFRP 板滑移	0.91

注: F_{ta} 为 CFRP 板平均最大拉力; τ_a 为不考虑纵向折减的平均界面剪应力; τ_{resa} 为平均界面残余剪应力; 纵向折减系数平均值为 0.92.

可知,随着界面压应力的增大,CFRP板平均界面剪应力呈上升趋势,几乎为线性关系.将平均界面剪应力和界面压应力进行拟合,可得如下关系式:

$$\tau = 0.1268\sigma_c - 0.05. \quad (13)$$



图 10 CFRP板滑移破坏状态

3 锚具优化设计

为实现锚具优化设计,需就锚具CFRP板尺寸、夹板厚度及界面压应力等参数对锚固性能的影响进行计算分析.将公式(12)代入公式(13),可得锚固区域CFRP板任意位置的界面剪应力如下:

$$\tau(x) = 0.1268\sigma(x) - 0.05. \quad (14)$$

3.1 夹板厚度的影响

若CFRP板尺寸已知,可根据公式(2)、(4)、(14)得到夹板厚度对锚具承载力和临界锚固长度的影响规律.本文以工程常用的100 mm×2.0 mm CFRP板为例,当板材设计抗拉强度为2400 MPa,锚具设计长度为400 mm,界面压应力为100 MPa时,夹板厚度对锚固性能的影响如图11~12所示.结合图12的拟合结果,可得到临界锚固长度的估算公式:

$$l_{cr} = 94170 - 9964.83333t_s + 397.0625t_s^2 - 7.04167t_s^3 + 0.04688t_s^4. \quad (15)$$

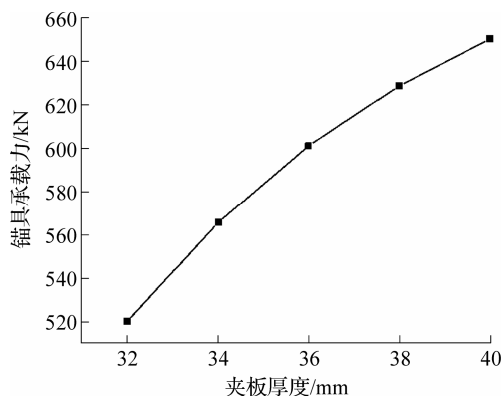


图 11 夹板厚度与锚具承载力的关系

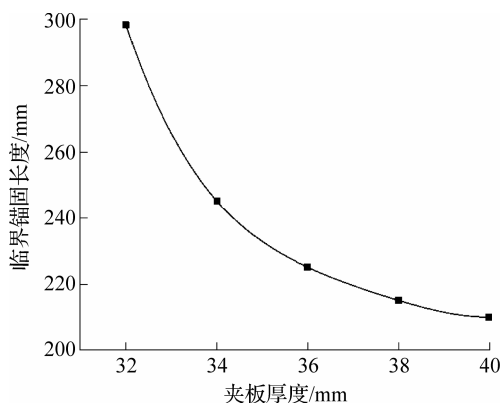


图 12 夹板厚度与临界锚固长度的关系

由图(11)可知,锚具承载力随着夹板厚度的增加呈上升趋势,且上升速率逐渐减小,夹板厚度由32 mm增大到40 mm时,锚具承载力提升了25%.由图(12)可知,锚具临界锚固长度随着夹板厚度的增大而减小,当夹板厚度从32 mm仅增大到34 mm时,临界锚固长度缩短了16.7%,而当夹板厚度从38 mm增大到40 mm时,临界锚固长度却只缩短了1.7%.由此可见,当夹板的厚度在一定范围内时,锚固性能对厚度比较敏感,选取合适的夹板厚度能有效地减少锚具的设计长度,当夹板达到一定的刚度后,锚固性能对厚度不再敏感.因此,通过上述计算分析可实现锚具厚度的优化设计.

3.2 界面压应力的影响

利用公式(2)、(4)、(14),可实现界面压应力对锚具承载力和临界锚固长度的影响分析.本文以CFRP板尺寸为100 mm×2.0 mm,板材设计抗拉强度2400 MPa,锚固长度为400 mm,夹板厚度为36 mm为例,计算结果如图13~14所示.结合图14的拟合结果,可得临界锚固长度的估算公式:

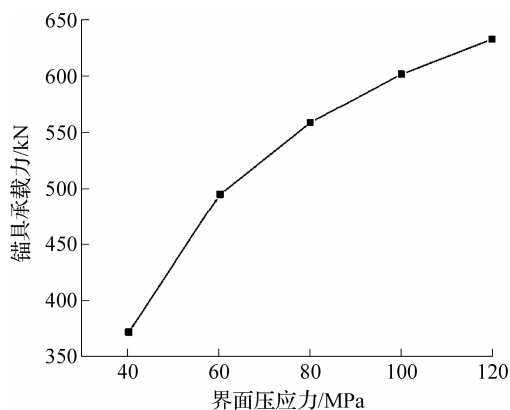


图 13 界面压应力与锚具承载力的关系

$$l_{cr} = 1657 - 46.20801\sigma_c + 0.61705\sigma_c^2 - 0.00397\sigma_c^3 + 9.89577 \times 10^{-6}\sigma_c^4. \quad (16)$$

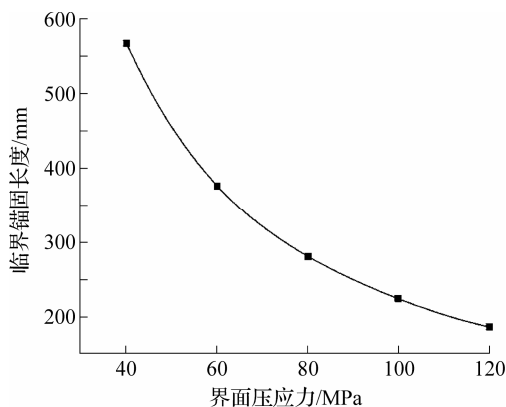


图 14 界面压应力与临界锚固长度的关系

计算结果表明, 锚具承载力随着界面压应力的增大而增大, 界面压应力为 40 MPa 时, 锚具承载力为 372 kN, 将压应力提升至 120 MPa 时, 锚具承载力为 632 kN, 锚固能力提升了 69.9%。临界锚固长度随着界面压应力的增大而减小, 当界面压应力从 40 MPa 提高到 120 MPa 时, 临界锚固长度缩短了 66.7%。因此, 锚具锚固性能对界面压应力的大小非常敏感。

对于特定的 CFRP 板尺寸, 当给定界面压应力时, 可以通过公式(3)、(12)和(13)计算不同夹板厚度所需的临界锚固长度; 当给定夹板厚度时, 可以通过公式(3)、(12)和(13)计算不同界面压应力所需的临界锚固长度。结合公式(15)、(16), 综合考虑锚具的经济性与可靠性, CFRP 板尺寸为 100 mm×2.0 mm, 板材设计抗拉强度 2 400 MPa, 界面压应力为 100 MPa 时, 夹板厚度最优值为 32 mm, 此时所需的临界锚固长度为 296 mm, 锚具设计承载力为 480 kN。

4 结论

本文建立了 CFRP 板平板锚具的承载力评估模型, 通过试验测得了模型所需的关键参数, 并利用该模型实现了该型锚具的优化设计, 得出以下结论:

(1) 锚具越长, 界面剪应力损失越大, 平板锚具纵向折减系数随着锚固长度的增大而减小。

(2) 锚具承载力和临界锚固长度对界面压应力和夹板厚度较为敏感。锚固性能随界面压应力的

增加而逐渐提高, 当界面压应力从 40 MPa 增加至 120 MPa 时, 承载力可提高 69.9%, 临界锚固长度可减小 66.7%; 锚固性能随夹板厚度的增加而逐渐提高, 提高幅度逐渐变小, 当夹板厚度从 32 mm 增加到 40 mm 时, 承载力可提高 25%, 临界锚固长度可减小 29.9%。

(3) 通过本文锚固性能评估模型可对 CFRP 板平板锚具设计承载力和临界锚固长度进行评估。当 CFRP 板尺寸为 100 mm×2.0 mm, 界面压应力为 100 MPa, 锚具夹板厚度为 32 mm 时, 所需的临界锚固长度为 296 mm, 此时锚具设计承载力为 480 kN。

本文在推导理论模型时, 假设整个受力过程各构件均处于线弹性状态, 忽略夹板由于受力过大、反复使用等原因产生的塑性变形, 理论结果会和实际有所偏差。

参考文献:

- [1] 叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3):24-36.
- [2] Reda M M, Sayed-Ahmed E Y, Shrive N G. Towards a new non-metallic anchorage system for post-tensioned applications with carbon fiber reinforced plastic tendons [C]. 42nd International SAMPE Symposium, Anaheim, USA, 1994:288-297.
- [3] 潘勇, 夏叶飞, 张红雷, 等. 预应力 CFRP 板在公路桥梁加固中的应用[J]. 中外公路, 2017(2):116-120.
- [4] Motavalli M, Czaderski C, Pfy-Lang K. Prestressed CFRP for strengthening of reinforced concrete structures: Recent developments at Empa, Switzerland[J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 15(2):194-205.
- [5] El-Hacha R, Gaafar M. Flexural strengthening of reinforced concrete beams using prestressed, near-surface-mounted CFRP bars[J]. PCI Journal, 2011, 56(4): 134-151.
- [6] Ali A, Abdalla J, Hawileh R, et al. CFRP mechanical anchorage for externally strengthened RC beams under flexure[J]. Physics Procedia, 2014, 55:10-16.
- [7] Garden H N, Hollaway L C. An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composite plates[J]. Composites Part B Engineering, 1998, 29(4):411-424.
- [8] André H P, Maier M. Post-strengthening with externally bonded prestressed CFRP strips[J]. IABSE Congress Report, 2000, 16(7):1507-1514.

- [9] Burtscher S L. Wedge anchorage for CFRP strips[J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12(4):446-453.
- [10] Kim Y J, Wight R G, Green M F. Flexural strengthening of RC beams with prestressed CFRP sheets: Development of nonmetallic anchor systems[J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12(1):35-43.
- [11] 薛伟辰, 曾磊, 谭园. 预应力 CFRP 板加固混凝土梁设计理论研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4):127-133.
- [12] 尚守平, 彭辉, 张毛心, 等. 土木建筑工程用的碳纤维板锚具: 200610031436.2[P]. 2006-09-06.
- [13] 邓朗妮, 姬帅, 张鹏, 等. 预应力碳纤维板夹片式锚具设计与试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(11):73-76.
- [14] 卓静, 李唐宁, 邢世建, 等. 一种锚固 FRP 片材的体外预应力新方法[J]. 土木工程学报, 2007, 40(1):15-19.
- [15] 吴志平, 俞志杰, 娄亮, 等. 预应力碳纤维板平板锚具锚固性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(2):251-256.
- [16] JSCE-E531-1995. Test method for tensile properties of continuous fiber reinforcing materials[S].

Theoretical and experimental study on load-carrying capacity evaluation of CFRP plates bond-type anchors

CHU Beiyu¹, QIAN Dengchao², ZHUGE Ping^{1*}, YANG Kelong¹

(1.School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Wenzhou Highway and Transportation Management Center, Wenzhou 325000, China)

Abstract: In order to reveal the anchoring mechanism of CFRP plate anchorage, a theoretical model of the carrying capacity was developed, and the model can be used to predict the critical anchorage length of CFRP plate anchorage. The relationship between shear stress and compressive stress on anchorage interface was obtained by experiments. The longitudinal reduction of shear stress and the ununiformity of transverse compressive stress of the anchorage zone were investigated in the model, and the longitudinal reduction coefficient of the interfacial shear stress was measured by experiments. Using the above model, the influence of the design parameters of anchorage system on anchorage performance was analyzed. The results show that the reduction rate of interfacial shear stress increases with the increase in anchorage length. The ununiformity of the transverse compressive stress distribution increases with the increase in anchorage width. By increasing the interfacial compressive stress and the thickness of splint, it can effectively improve the uniformity of the transverse compressive stress distribution. The critical anchorage length decreases with the increase of the splint thickness, and when the splint reaches the appropriate thickness, the influence on the critical anchorage length decreases gradually. With the increase of interfacial compressive stress, however, the interfacial shear stress shall increase and the critical anchorage length shall decrease. When the interfacial pressure stress is less than 100 MPa, it has a linear relationship with the interfacial shear stress. For the commonly used CFRP plate size 100 mm×2.0 mm in engineering, when the interfacial compressive stress is 100 MPa and the splint thickness of plate anchorage is 32 mm, the required critical anchorage length is 296 mm, and the corresponding anchorage design bearing capacity is 480 kN, which can give full play to the tensile strength of CFRP plate theoretically.

Key words: bridge engineering; CFRP plates; bond-type anchor; interfacial shear stress; load-carrying capacity

(责任编辑 韩 超)